

# 水位升降对库岸土质滑坡稳定性影响及安全系数计算分析

姚 旺 龙陆军

重庆市地质矿产勘查开发局 205 地质队 重庆 401123

**摘要:** 本文聚焦水位升降对库岸土质滑坡稳定性的影响及安全系数计算分析。阐述库岸滑坡地质环境特征、水位变化类型与作用机制,从渗透力计算、稳定性分析方法、安全系数动态计算模型等方面进行理论剖析。探究水位升降各阶段对滑坡稳定性的影响规律,开展关键因素敏感性分析。针对传统方法局限提出改进措施,并结合工程实际给出应用建议,为库岸滑坡防控提供科学依据。

**关键词:** 库岸滑坡;水位升降;渗透力;稳定性分析

**引言:** 库岸土质滑坡是水库周边常见地质灾害,威胁工程安全与生态环境。水位升降作为关键影响因素,其变化模式复杂多样,通过改变坡体应力、渗流场及土体性质,影响滑坡稳定性。传统安全系数计算方法在水位升降场景下存在诸多局限,难以精准评估滑坡风险。因此,深入研究水位升降对库岸土质滑坡稳定性的影响,构建科学合理的安全系数计算模型,具有重要的理论与现实意义。

## 1 库岸土质滑坡基本特征与水位变化模式

### 1.1 库岸土质滑坡的地质环境特征

库岸土质滑坡的发育与区域地质环境深度耦合,其地质背景呈现显著的分层性与复杂性。库区地层多以第四系松散堆积物为主,涵盖粉质黏土、粉砂、卵砾石层等,土体颗粒级配差异大,黏粒含量普遍在15%~35%区间,导致土体渗透性与抗剪强度呈现各向异性。区域地形多为低山丘陵地貌,库岸坡度集中在 $15^{\circ}$ ~ $35^{\circ}$ ,坡体形态受水流侵蚀与风化作用影响,形成凹凸不平的坡脚与多级平台。地质构造上,库区多处于褶皱带边缘或断裂带附近,岩体破碎程度高,为坡体地下水的渗流提供了通道,同时改变了土体的物理力学性质<sup>[1]</sup>。另外,库区气候多为亚热带季风气候,降雨集中且强度大,降雨入渗与库水浸泡共同作用,加剧了坡体土体的软化与劣化,为土质滑坡的孕育奠定了基础地质条件。

### 1.2 水库水位变化类型

水库水位变化呈现周期性、阶段性与突发性并存的特征,可划分为自然调度型与极端事件型两大类。自然调度型是库区水位变化的主流,依据调度周期可分为汛期消落型、枯水期补给型与年度调蓄型三类。汛期消落型水位变化速率快,月降幅可达3~5米,主要发生在6~9月,为应对洪水腾出库容;枯水期补给型水位呈缓慢上升趋势,月增幅1~2米,集中在11月至次年2月,保障下游供

水与生态用水。年度调蓄型则随水库运行周期呈现“低-高-低”的年度波动,幅度一般在10~20米。极端事件型水位变化受突发因素驱动,包括极端暴雨引发的库水骤升、库区溃决导致的水位骤降等,其变化速率可达10米/天以上,持续时间短但破坏力极强。不同类型的水位变化模式,直接决定了库岸坡体的渗流场演化与稳定性响应。

### 1.3 水位变化对滑坡的作用机制

水位变化通过改变坡体的应力状态、渗流场与土体性质,形成多维度的滑坡触发机制。其一为渗流力驱动机制,水位升降时,坡体内部孔隙水压力快速响应,上升阶段孔隙水压力升高,有效应力降低,土体抗剪强度衰减;下降阶段则产生反向渗透力,拉裂坡体岩土体,诱发张拉裂缝。其二为土体软化劣化机制,库水长期浸泡使土体含水率显著提升,黏聚力与内摩擦系数分别下降15%~40%与10%~25%,土体结构发生不可逆破坏。其三为坡脚侵蚀机制,水位消落期水流对库岸坡脚的冲刷作用,导致坡体抗滑段土体流失,抗滑力减小,坡体稳定性系数持续降低。另外,水位变化引发的坡体振动与应力重分布,还会激活潜在滑动面,使原本稳定的坡体进入渐进式变形阶段,最终诱发滑坡灾害。

## 2 水位升降下渗透力与滑坡稳定性理论分析

### 2.1 渗透力计算模型

针对水位升降过程中库岸土质坡体的渗透力计算,需结合土体渗流特性与水位变化速率,构建多场景渗透力计算模型。基于达西定律,建立饱和-非饱和和渗流耦合模型,充分考虑土体孔隙率、渗透系数会随着含水率产生动态变化这一特性。通过该耦合模型,能够更精准地模拟土体在不同含水状态下的渗流情况,为后续渗透力计算提供可靠依据。针对水位骤升骤降这一特殊场景,引入瞬态渗流理论。由于水位快速变化时,孔隙水压力会随时间发生演化,基于此将渗透力分解为稳态渗透力与

瞬态附加渗透力。运用有限元法求解瞬态渗流场，能够清晰地得到不同时刻渗透力在坡体中的分布规律，从而深入了解水位快速变化对坡体渗透力的影响。结合库岸土体具有分层特征这一实际情况，构建分层介质渗透力计算模型。考虑到不同土层的渗透系数存在差异，该模型可以对渗透力的空间分布特征进行修正，使计算结果更贴合实际。

### 2.2 滑坡稳定性分析方法

在水位升降的复杂环境下，对库岸土质滑坡稳定性展开分析，需构建一个融合极限平衡法与有限元法的多方法耦合分析体系，以此确保分析结果的全面性与精准性。极限平衡法作为经典的分析手段，包含瑞典条分法、毕肖普法等多种具体方法。其基本思路是先对滑动土体进行条块划分，再分别计算每个条块所受到的抗滑力与滑动力，最后通过两者的比值求解出稳定性系数<sup>[2]</sup>。考虑到水位变化这一关键因素，要对极限平衡法的参数取值进行改进，把孔隙水压力、渗透力作为动态参数纳入计算过程，从而深入分析不同水位阶段滑坡稳定性的响应情况。有限元法有着独特的优势，它能够模拟坡体的应力-应变关系，精准地捕捉到水位升降过程中坡体塑性区的发展状况以及位移场的演化特征，进而准确识别出潜在滑动面的位置与形态。另外，引入可靠度分析方法也十分必要。该方法考虑了土体参数、水位变化等因素的随机性，通过计算滑坡失稳的概率，进一步提升分析结果的可靠性。最终，通过多种方法的对比验证，实现对库岸土质滑坡稳定性的全面、精准评估。

### 2.3 安全系数动态计算模型

基于水位变化在不同阶段呈现出的特征，以及坡体稳定性随之产生的动态响应规律，我们着手构建库岸土质滑坡安全系数动态计算模型。该模型以时间为变量，将水位升降这一复杂过程细致划分为上升、稳定、下降三个阶段，并针对每个阶段分别建立相应的安全系数计算方式。在水位上升阶段，孔隙水压力会迅速增长，同时土体发生软化，二者相互耦合对坡体稳定性产生影响。此时，计算安全系数需充分考虑这两种因素的综合作用。当水位处于稳定阶段，渗透力逐渐趋于稳定，此时安全系数主要受到土体长期浸泡后的强度以及坡体应力状态的影响，采用稳态渗流条件下的安全系数计算模型进行计算。而水位下降阶段情况更为复杂，不仅要引入反向渗透力，还需考虑坡脚侵蚀带来的影响，安全系数会随着水位的下降呈现线性衰减趋势。为更精准地把握安全系数的变化，结合敏感性分析，确定水位变化速率、土体参数等关键影响因素对安全系数的权重，进而实现对

安全系数的动态预测，为库岸土质滑坡的风险预警提供科学依据。

## 3 水位升降对滑坡稳定性的影响规律

### 3.1 水位上升阶段的影响

水位上升阶段，库岸坡体处于长期浸泡环境，其稳定性呈现“先缓降、后骤降”的变化规律。初期水位上升时，坡体土体缓慢吸水，含水率小幅增加，土体抗剪强度缓慢衰减，稳定性系数以0.002-0.005/天的速率缓慢下降，坡体处于渐进式变形阶段。当水位上升速率超过0.5米/天时，坡体内部孔隙水压力快速升高，有效应力急剧降低，土体软化程度加剧，稳定性系数下降速率显著提升至0.01-0.02/天。同时，水位上升使坡体后缘裂缝充水，增加了裂缝的静水压力，进一步拉裂坡体，扩大滑动面范围。通过数值模拟发现，水位上升至坡体中部时，稳定性系数降幅可达15%-20%，此时坡体变形量明显增大，裂缝宽度拓展至5-10厘米，为滑坡失稳埋下隐患。

### 3.2 水位下降阶段的影响

水位下降阶段是库岸土质滑坡失稳的关键时期，稳定性呈现“快速劣化、突发失稳”的特征。水位下降初期，坡体内部孔隙水压力滞后消散，产生负压吸力，增强了土体的有效应力，稳定性系数短暂回升。但随着水位持续下降，坡体与库水形成较大的水力梯度，反向渗透力急剧增大，同时坡脚水流冲刷作用加剧，抗滑段土体流失速度加快<sup>[3]</sup>。当水位下降速率超过1米/天时，反向渗透力可达15-30kPa，坡体抗滑力大幅降低，稳定性系数以0.03-0.05/天的速率快速下降。研究表明，水位下降至坡脚以下5米左右时，稳定性系数降至临界值以下，坡体进入突发失稳阶段，此时坡体位移速率可达10-20毫米/小时，极易引发大规模滑坡灾害。

### 3.3 关键影响因素敏感性分析

通过控制变量法，选取水位变化速率、土体物理力学参数、坡体几何特征三类关键因素，开展敏感性分析，明确各因素对滑坡稳定性的影响程度。水位变化速率为最敏感因素，当变化速率从0.2米/天提升至2米/天时，稳定性系数降幅从5%增至40%，呈指数增长趋势。土体参数中，黏聚力的敏感性高于内摩擦角，黏聚力每降低10kPa，稳定性系数下降0.15-0.23；内摩擦角每降低2°，稳定性系数下降0.08-0.12。坡体几何特征中，坡高与坡脚坡度的敏感性显著，坡高每增加10米，稳定性系数下降0.2-0.35；坡脚坡度从15°增至35°，稳定性系数降幅达25%-30%。土体含水率、渗透系数等参数也对稳定性有一定影响，但其敏感性低于上述三类核心因素。基于敏感性分析结果，可针对性制定滑坡防控措施，优先控制高敏感因素

的影响。

#### 4 安全系数计算方法优化与工程应用

##### 4.1 传统方法的局限性

传统库岸滑坡安全系数计算方法在水位升降场景下存在明显局限性。其一，参数取值静态化，传统方法多采用土体天然状态下的物理力学参数，未考虑水位升降引发的土体软化、孔隙水压力动态变化等效应，导致计算结果与实际稳定性偏差较大。其二，渗流模拟简化处理，多数传统方法忽略坡体的饱和-非饱和渗流特性，仅采用稳态渗流模型计算孔隙水压力，无法准确反映水位骤升骤降过程中瞬态渗流场的演化规律，渗透力计算精度不足。其三，分析场景单一，传统方法多针对稳定水位条件下的滑坡稳定性，缺乏对水位升降不同阶段的动态分析，难以适应水库调度引发的复杂水位变化。其四，工程适用性不足，传统方法未结合库岸土体分层、坡体几何特征等实际工程条件，计算结果难以直接指导滑坡防控工程设计，存在较大的工程应用误差。

##### 4.2 改进方法提出

针对传统方法的局限性，从参数动态化、渗流精准化、分析动态化三个维度提出改进方法。参数动态化方面，构建土体物理力学参数随含水率、水位变化的动态数据库，通过室内试验拟合得到参数演化公式，实现参数的实时取值。渗流精准化方面，建立饱和-非饱和瞬态渗流耦合模型，结合有限元法求解不同水位阶段的孔隙水压力分布，精准计算瞬态渗透力，修正传统稳态渗流模型的误差。分析动态化方面，构建水位升降分阶段的安全系数计算体系，分别针对上升、稳定、下降阶段建立差异化计算模型，实现稳定性的动态评估。同时，引入机器学习算法，融合历史水位数据、坡体变形监测数据，训练安全系数预测模型，提升计算效率与预测精度。通过多维度改进，形成适用于水位升降场景的库岸土质滑坡安全系数精准计算方法。

##### 4.3 工程应用建议

在库岸工程实际中，基于改进的安全系数计算方法可提出诸多实用工程应用建议。在水库调度方案制定前期，开展全面且细致的勘察评估工作至关重要。运用改

进方法对库岸滑坡展开稳定性预评估，依据评估结果精准划分滑坡风险等级。不同风险等级能为调度方案的优化提供关键依据，确保调度方案在保障水库功能的同时，最大程度降低对库岸滑坡稳定性的影响。结合改进模型的计算成果，实施动态监测预警体系<sup>[4]</sup>。合理布设水位、位移、孔隙水压力等监测传感器，构建实时监测系统。该系统可实时掌握库岸滑坡的各项关键指标变化，一旦安全系数接近临界值，能迅速发出预警信号，为后续应对措施争取宝贵时间。针对不同风险等级的滑坡制定分级防控措施。对于高风险滑坡，采用抗滑桩、锚杆锚索等支挡工程增强其稳定性，同时配合截排水工程降低坡体含水率；中低风险滑坡则通过削坡减载、坡面防护等措施提升稳定性。防控工程实施后，利用改进方法定期复核安全系数，根据复核结果动态调整防控措施，保障滑坡长期稳定，实现水位升降下库岸土质滑坡的有效防控，维护工程安全与生态环境稳定。

#### 结束语

本文围绕水位升降对库岸土质滑坡的影响展开研究，从理论分析到影响规律探究，再到传统方法局限剖析与改进方法提出，最后给出工程应用建议，形成较为完整的研究体系。研究结果有助于更精准地把握水位升降下库岸土质滑坡的稳定性变化，为滑坡防控提供有力支持。未来可进一步结合实际工程，优化模型与防控措施，提升库岸工程的安全性及稳定性。

#### 参考文献

- [1]曾元勇.水位变动对库岸土质滑坡变形影响分析[J].地质灾害与环境保护,2022,33(4):80-84.
- [2]梁学战,陈洪凯,刘彬.三峡库区典型土质滑坡抗剪强度参数的敏感因素分析——以神女溪青石滑坡为例[J].防灾科技学院学报,2023,25(3):10-17.
- [3]孙文铎,王世梅,王力,等.前缘塌岸对三峡库区淹锅沙坝滑坡变形影响分析[J].科学技术与工程,2023,23(4):1424-1435.
- [4]杨泉.双峰县南冲水库库内左岸滑坡体处理方案研究[J].湖南水利水电,2024(4):28-30.